

# ANALIZA HARMONOGRAMÓW POWYKONAWCZYCH W BUDOWNICTWIE

Wojciech BOŻEJKO, Zdzisław HEJDUCKI, Mariusz UCHROŃSKI,  
Mieczysław WODECKI

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodę wykorzystania harmonogramów powykonawczych do oceny przebiegu procesu budowlanego, w trakcie którego występują nieprzewidywalne zakłócenia. Powodują one dezaktualizację przyjętych harmonogramów i przekroczenie ustalonych w umowach terminów, co wpływa negatywnie na sytuację finansową przedsiębiorstw. W celu urealnienia konstruowanych harmonogramów, niektóre niepewne parametry procesu są modelowane przez liczby rozmyte. Przedstawiamy wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych, których celem było zbadanie wpływu funkcji defuzyfikacji liczb rozmytych na stabilność rozwiązań, problemu potokowego, wyznaczonych przez algorytm przeszukiwania z tabu.

**Słowa kluczowe:** proces budowy, liczby rozmyte, problem potokowy, harmonogramowanie, stabilność algorytmu.

## 1. Wprowadzenie

Realizacja obiektów budowlanych jest często związana z pojawiającymi się w toku robót przerwami technologicznymi, organizacyjnymi i innymi. Czynniki zewnętrzne i zakłócenia wewnętrzne występujące w procesie budowy, przewidywalne i nieprzewidywalne, są przyczyną dezaktualizacji harmonogramów i występowania często odchyłeń od ustalonych w umowach terminów realizacji zakontraktowanych robót. Wywołuje to niechęć wszystkich zainteresowanych procesem realizacji do tworzenia dokumentów, które szybko tracą aktualność.

Jednym ze sposobów samooceny organizacji robót i kontroli ich przebiegu mogą być harmonogramy powykonawcze. Umożliwiają one odwzorowanie rzeczywistego przebiegu robót w czasie z uwzględnieniem miejsca ich wykonania. Mogą być przedstawione w dowolnej formie, np. zapisu dat rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych robót, odwzorowania graficznego za pomocą wykresów liniowych, cyklogramów lub grafów.

W trakcie robót lub po ich zakończeniu, na podstawie obserwacji lub danych z dokumentów budowy, można odwzorować przebieg realizacji z uwzględnieniem przerw i zakłóceń, ustalając ich przyczyny. Stanowi to obszerny zbiór danych umożliwiających doskonalenie sprawności organizacyjnej firm, wpływając na ich konkurencyjność i umożliwiając wykorzystanie tych danych w przetargach.

Analiza harmonogramów powykonawczych pozwala na określenie wewnętrznych norm - wskaźników, niezbędnych do ustalenia nakładów na wykonanie jednostki produkcji. Jest to istotne, bowiem może służyć np. do szacowania rzeczywistych kosztów bezpośrednich związanych z wykonaniem danego rodzaju robót, śledzenia i sterowania kosztami realizacji. Umożliwia techniczne uzasadnienie wartości wskaźników ekonomicznych firmy. Ponadto, jest inspiracją do prowadzenia prac nad algorytmami umożliwiającymi konstruowa-

nie stabilnych (proaktywnych, Klimek i Łebkowski [5]) harmonogramów, odpornych na nieprzewidywalne zakłócenia pojawiające się w trakcie realizacji projektów.

W ostatnich latach można zaobserwować duże zainteresowanie metodami sztucznej inteligencji: sieciami neuronowymi, algorytmami genetycznymi oraz systemami rozmytymi. Pozwalają one na opis rzeczywistych zjawisk za pomocą pojęć, które są nieprecyzyjne, niepewne i wieloznaczne. Problemy podejmowania decyzji w warunkach niepewności rozwiązuje się stosując metody probabilistyki (jeżeli niepewne informacje mają charakter losowy) lub teorii zbiorów rozmytych. To drugie podejście stosuje się szczególnie wówczas, gdy nie są znane rozkłady zmiennych losowych lub w opisie brak jest ich ostrych granic. Stosowanie liczb rozmytych umożliwia uwzględnienie niepewności parametrów procesu już na etapie budowy modelu i konstrukcje stabilnych harmonogramów w pełni akceptowalnych przez praktyków (zobacz Bożejko i in. [1] oraz [2]).

## 2. Harmonogramy powykonawcze

Analiza harmonogramów powykonawczych dotyczy może pojedynczych zadań, jak i całego portfela zleceń firmy obejmujących ustalony odcinek czasu. W przypadku konieczności ustalenia kolejności zadań oraz określenia racjonalnego uzasadnienia czasu prowadzenia robót na obiektach niezbędnym staje się harmonogramowanie realizacji robót. System zadań dla danego zbioru zasobów firmy może być zdefiniowany jako czwórka:

$$\Omega = [J, \prec, T, Z, W],$$

gdzie:

- J** - zbiór zadań do wykonania,
- $\prec$**  - relacja częściowego porządku na **J** (ograniczenia kolejnościowe),
- T** - macierz czasów wykonywania robót,
- Z** - zapotrzebowania zasobowe,
- W** - współczynniki (funkcje) kosztów opóźnień zadań.

Harmonogram systemu  $\Omega$  jest odwzorowaniem przyporządkowującym każdemu zadaniu odpowiednią ilość zasobu oraz przedział na osi czasu, w którym będzie ono wykonywane. Jako kryterium optymalności stosuje się zazwyczaj: całkowity czas wykonywania, czas oczekiwania zadań na realizację, spóźnienia wykonywania zadań, itp.

### 2.1. Ocena przebiegu robót

Harmonogram powykonawczy pozwala na udokumentowanie rzeczywistego przebiegu robót budowlanych. Pojawia się wówczas potrzeba oceny różnic pomiędzy planowanym a rzeczywistym harmonogramem robót. Jednym ze sposobów takiego porównania może być wykorzystanie metodyki oceny jakości organizacji robót. Z uwagi na to, że czas trwania kompleksu robót może być jednym z elementów oceny przebiegu realizacji istnieje możliwość uwzględnienia dodatkowych cech, wykorzystując zbiór kryteriów elementarnych. Pozwalają one na cząstkową ocenę procesu realizacji, a następnie za pomocą wskaźnika syntetycznego na jego całkowite określenie.

Analizując podstawowe własności sprawnej organizacji polegające na równoczesności i równoległości robót stosuje się wiele kryteriów. Wyznaczane wskaźniki charakteryzują rzeczywisty przebieg poszczególnych procesów roboczych. Uwzględniają zakłócenia pojawiające się w procesie realizacji, wynikające z wielu czynników (np. brak materiału, złe

warunki atmosferyczne, brak środków finansowych, błędy w dokumentacji, itp.) Zjawiska te mają wpływ na przebieg całego procesu budowy, mogąc wywoływać przestoje na skutek braku dostępności frontów roboczych. Są one świadectwem sprawności organizacyjnych firm biorących udział w realizacji robót. Do elementarnych kryteriów oceny przebiegu procesu zaliczamy:

1) **Wykonanie kompleksu robót w ustalonym terminie.**

Kryterium to charakteryzuje wielkość odchyłki rzeczywistej realizacji zadania od planowanej. W obecnej praktyce, dla większości robót wskaźnik ten jest bliski jedności, gdyż sprawność wyspecjalizowanych firm i stosowane kary umowne mobilizują do planowego działania i dotrzymywania terminów.

$$K_1 = \begin{cases} \frac{T_p}{T_R}, & \text{gdy } T_p < T_R, \\ \frac{T_R}{T_p}, & \text{gdy } T_p \geq T_R. \end{cases}$$

gdzie:

$T_p$  - planowany czas realizacji kompleksu robót,

$T_R$  - rzeczywisty czas realizacji kompleksu robót.

2) **Wykonanie procesów budowlanych w planowanym czasie.**

Kryterium to dotyczy poszczególnych rodzajów robót.

$$K_2 = \frac{\sum_i T_i^R}{\sum_i T_i^R + \Delta T_i^R},$$

gdzie:

$T_i^R$  - planowany czas realizacji  $i$ -tej roboty,

$\Delta T_i^R$  - przekroczenie/skrócenie czasu realizacji  $i$ -tej roboty.

3) **Przekazywanie frontów roboczych w planowanym terminie.**

$$K_3 = \frac{\sum_j T_j^F}{\sum_j T_j^F + \Delta T_j^F},$$

gdzie:

$T_j^F$  - planowany termin przekazania  $j$ -tego frontu robót,

$\Delta T_j^F$  - przekroczenie/skrócenie terminu przekazania  $j$ -tego frontu robót.

Przedstawione, przykładowe kryteria elementarne pozwalają na ogólną ocenę przebiegu robót i dotyczą zakłóceń czasu realizacji. Pojawia się również konieczność analizy innych elementów np. płynności finansowania robót, co również stanowi istotny czynnik efektywności procesu budowy.

Stosując syntetyczne wskaźniki można, uwzględniając zewnętrzne warunki budowy danego obiektu (np. szczególną terminowość, ze względu na montaż urządzeń technologicznych), zastosować wagi do kryteriów elementarnych. Wyznaczany w ten sposób wskaźnik syntetyczny:

$$K = \frac{w_1 K_1 + w_2 K_2 + w_3 K_3}{w_1 + w_2 + w_3},$$

gdzie:

$w_1, w_2, w_3$  – wagi kryteriów elementarnych  $K_1, K_2, K_3$ ,  
umożliwia całościową ocenę przebiegu procesu.

## 2.2. Zastosowanie metodyki analizy harmonogramów powykonawczych

Dokładna analiza realizacji przedsięwzięć budowlanych jest szczególnie przydatna w przypadku wyspecjalizowanych firm (np. wykonujących pokrycia dachowe, konstrukcje hal, itp.) do planowania realizacji powtarzalnych robót na różnych obiektach.

### Studium przypadku

Zadanie inwestycyjne polega na realizacji zakładu produkcyjnego szkła technicznego. Zakład stanowi kompleks składający się z części administracyjno - socjalnej, hal produkcyjnych, infrastruktury technicznej (stacja transformatorowa, oczyszczalnia ścieków, drogi dojazdowe, parkingi, oświetlenie, ogrodzenie i in.).

Przedmiotem szczegółowej analizy jest proces realizacji hali produkcyjnej (faza VI projektu) o powierzchni 2600 m<sup>2</sup>, wykonywanej wg indywidualnego projektu z obudową z blach trapezowych i z szklaną fasadą. Zadanie inwestycyjne podzielone zostało na kilka faz. Opis oraz planowane czasy realizacji przedstawiono w Tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Fazy inwestycji (czasy podano w tygodniach).

Nr fazy	Treść zadania	Czas trwania	Termin rozpoczęcia	Termin zakończenia	Odchylenie rzeczywiste
I	zagadnienia formalno-prawne związane z zakupem gruntu	5	5	10	2
II	prace przedprojektowe (technologia, bilans mediów, operat geologiczno- inżynierski)	4	10	15	1
III	uzyskanie zapewnienia dostaw mediów i odbioru ścieków, opinie ochrony środowiska	35	11	46	21
IV	opracowanie dokumentacji projektowej	21	10	31	0
V	ogłoszenie przetargu, analiza ofert i przygotowanie umów	10	21	31	0
<b>VI</b>	<b>Proces realizacji obiektu</b>	17	33	50	0
VII	zakończenie budowy – odbiory, uruchomienie, rozruch	plan. 14	50	w toku	?

Analizując przebieg budowy podkreślić można sprawną realizację robót budowlanych, instalacyjnych i projektowych, natomiast w działalności związanej z uzyskaniem zapewnienia dostaw mediów pojawia się szereg trudności. Związane są one z małą efektywnością działalności urzędników samorządowych odpowiedzialnych za decyzje o warunkach przyłączenia.

Tabela 2. Przebieg procesu realizacji (czasy podano w tygodniach).

L.p.	Nazwa procesu	Rozpoczęcie	Zakończenie	Czas trwania	suma przerw zadań	suma przerw na frontach
1.	prace geodezyjne, zagospodarowanie terenu	33	34	1		
2.	wykonanie zasilania budowy (woda, energia)	34	35	1		
3.	wykonanie zaplecza – ogrodzenie	33	34	1		
4.	roboty ziemne	34	43	7	2	2
5.	fundamenty	35	41	6		1,5
6.	montaż konstrukcji	38	42	4		
7.	dach	40	44	4		2
8.	obudowa	39	44	5		
9.	okna, drzwi, bramy	43	47	4		
10.	wykonanie posadzek	44	46	2		2
11.	instalacje	44	48	4		1
12.	roboty wykończeniowe	45	49	4		
13.	montaż suwnicy	48	49	1		
14.	mała architektura	36	49	13	2	2
15.	montaż urządzeń technologicznych	43	10	14		
16.	sieci i przyłącza	34	42	8		
17.	instalacja podposadzkowa	40	43	3		
<b>SUMA</b>				<b>82</b>	<b>4</b>	<b>10,5</b>

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, stosując przykładowe wskaźniki elementarne stwierdzono wysoki poziom organizacji procesu, gdyż podstawowy wskaźnik  $K_1$  - wykonanie robót w ustalonym terminie wynosi 1. Planowany czas realizacji  $I_p = 118$  dni. Rzeczywisty czas realizacji  $T_R = 118$  dni (przyjęto początek odbioru robót).

$$K_1 = \frac{T_R}{I_p} = \frac{118}{118} = 1.$$

Dotrzymanie przyjętego terminu wynikało ze szczególnego potraktowania zadania przez Wykonawców poprzez koncentrację środków z uwagi na dotkliwe kary umowne. W procesie pojawiały się przerwy w prowadzeniu robót różnego rodzaju, co wyraża się wartością wskaźnika  $K_2$  - wykonania robót w planowanym terminie.

$$K_2 = \frac{\sum_i T_i^R}{\sum_i T_i^R + \Delta T_i^R} = \frac{82}{82 + 4} = \frac{82}{86} = 0,9535.$$

Przerwy w prowadzeniu robót na frontach roboczych  $K_3$  stanowiły:

$$K_3 = \frac{\sum_j T_j^F}{\sum_j T_j^F + \Delta T_j^F} = \frac{82}{82 + 10,5} = 0,8865.$$

Wskaźnik syntetyczny dla realizacji obiektu wynosi:

$$K = \frac{1 + 0,95 + 0,89}{3} = 0,95.$$

Otrzymany wynik (wskaźnik syntetyczny) jest bliski jedności. Stwierdzono, że pojawiające się w procesie realizacyjnym kolizje na frontach roboczych nie miały dużego wpływu na termin budowy hali. Sprawne działanie nadzoru w trakcie prowadzonych robót pozwoliły zniwelować pojawiające się zakłócenia toku realizacji. Zaproponowany sposób oceny harmonogramów powykonawczych nie ogranicza analizy rezultatów, stanowi jedynie wskazówkę umożliwiającą doskonalenie przedstawionej procedury.

Przy realizacji wielu budów wskaźniki oceny przebiegu robót nie są tak dobre jak w przedstawionym przykładzie. Wynikają one z jednej strony z unikalności procesu (brak danych porównawczych) a z drugiej, z powodu wielu nieprzewidywalnych zakłóceń (szczególnie przy dużych i długo trwających projektach). Dlatego przy konstrukcji harmonogramów, dla tego typu przedsięwzięć stosuje się metody probabilistyczne oraz logikę rozmytą.

### 3. Systemy potokowe z rozmytymi parametrami

System pracy potokowej w budownictwie jest odpowiednikiem produkcji taśmowej (przepływowej) w przemyśle (zobacz Bożejko [3], Wodecki [8]). Dotyczy realizacji kompleksu obiektów składających się z wielu jednakowych prac wykonywanych przez wyspecjalizowane brygady. Obiektom odpowiadają zadania, brygadą - maszyny, a pracą wykonywaną przez brygady - operacje. Kolejności wykonywania prac na obiekcie odpowiada porządek technologiczny.

Planowanie przebiegu robót budowlanych w systemach potokowych jest uzasadnione w przypadku realizacji obiektów, na których można wydzielić: działki robocze, sektory, odcinki niezależne technologicznie, tj. zadania o dużej pracochłonności robót, np. kompleksy przemysłowe, zespoły budynków mieszkalnych, odcinki dróg, sieci wodociągowe i kanalizacyjne, itp. Pojawia się wówczas problem synchronizacji w czasie i przestrzeni wielu robót budowlanych możliwych do prowadzenia równoległe i jednocześnie. Są to bardzo ważne zagadnienia praktyki budowlanej. Ich harmonogramowanie napotyka na wiele trudności, są to bowiem zazwyczaj zupełnie nowe, *silnie NP-trudne* problemy optymalizacji kombinatorycznej.

### 3.1. Rozmyte czasy wykonywania prac budowlanych

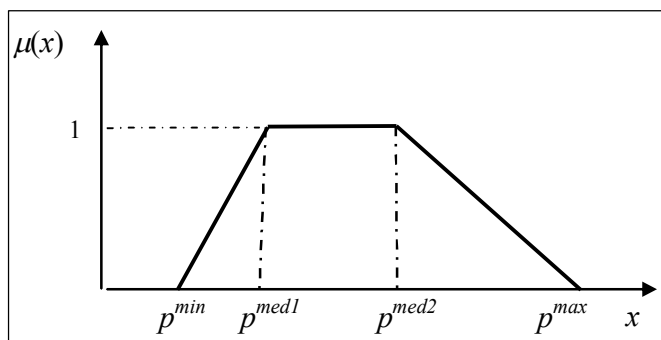
Rozpatrujemy kompleksu obiektów realizowany w systemie potokowym (system ten jest dokładnie opisany w pracy Rogalska i in. [7]). Niepewne czasy wykonywania prac są reprezentowane przez tzw. trapezoidalne liczby rozmyte

$$\tilde{p}_{i,j} = (p_{i,j}^{\min}, p_{i,j}^{\text{med1}}, p_{i,j}^{\text{med2}}, p_{i,j}^{\max}),$$

gdzie  $i$  jest numerem pracy, a  $j$  – brygady. Funkcja przynależności liczby

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - p^{\min}}{p^{\text{med1}} - p^{\min}}, & x \in [p^{\min}, p^{\text{med1}}), \\ 1, & x \in [p^{\text{med1}}, p^{\text{med2}}), \\ \frac{p^{\max} - x}{p^{\max} - p^{\text{med2}}}, & x \in [p^{\text{med2}}, p^{\max}]. \end{cases}$$

Jej wykres przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1. Trapezoidalna liczba rozmyta.

**Uwaga.**

Suma  $\tilde{a} + \tilde{b}$  trapezoidalnych liczb rozmytych  $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$  oraz  $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$

$$\tilde{a} + \tilde{b} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4).$$

Podobnie, wartość maksymalna

$$\max\{\tilde{a}, \tilde{b}\} = (\max\{a_1, b_1\}, \max\{a_2, b_2\}, \max\{a_3, b_3\}, \max\{a_4, b_4\})$$

W notacji liczb rozmytych moment zakończenia wykonywania pracy  $\pi(i)$  przez  $j$ -tą brygadę można zapisać następująco:

$$\tilde{C}_{\pi(i),j} = (C_{\pi(i),j}^{\min}, C_{\pi(i),j}^{\text{med1}}, C_{\pi(i),j}^{\text{med2}}, C_{\pi(i),j}^{\max}),$$

gdzie wartości  $C_{\pi(i),j}^{\min}$ ,  $C_{\pi(i),j}^{\text{med1}}$ ,  $C_{\pi(i),j}^{\text{med2}}$ ,  $C_{\pi(i),j}^{\max}$  można wyznaczyć z rekurencyjnych zależności:

$$\begin{aligned} C_{\pi(i),j}^{\min} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\min}, C_{\pi(i),j-1}^{\min}\} + p_{\pi(i),j}^{\min}, \\ C_{\pi(i),j}^{\text{med1}} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\text{med1}}, C_{\pi(i),j-1}^{\text{med1}}\} + p_{\pi(i),j}^{\text{med1}}, \\ C_{\pi(i),j}^{\text{med2}} &= \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\text{med2}}, C_{\pi(i),j-1}^{\text{med2}}\} + p_{\pi(i),j}^{\text{med2}}, \end{aligned}$$

$$C_{\pi(i),j}^{\max} = \max\{C_{\pi(i-1),j}^{\max}, C_{\pi(i),j-1}^{\max}\} + p_{\pi(i),j}^{\max},$$

z warunkami początkowymi

$$C_{\pi(0),j}^{\min} = C_{\pi(0),j}^{\text{med1}} = C_{\pi(0),j}^{\text{med2}} = C_{\pi(0),j}^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

$$C_{\pi(i),0}^{\min} = C_{\pi(i),0}^{\text{med1}} = C_{\pi(i),0}^{\text{med2}} = C_{\pi(i),0}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Wynikiem działań (arytmetycznych) na liczbach rozmytych jest liczba rozmyta. W algorytmach rozwiązujących problemy optymalizacji dyskretnej wielokrotnie porównywane są ze sobą pewne wielkości (m. in. wartości funkcji celu). W związku z tym występuje potrzeba odwzorowania liczby rozmytej w jedną wartość (liczbę rzeczywistą - wartość dokładną). Operacja odwzorowania zwana *wyostrzaniem* (*ang. defuzzification*) realizowana jest przez funkcję defuzyfikacji. Dobór funkcji defuzyfikacji liczb rozmytych powinien uwzględniać specyfikę problemu oraz postać liczb rozmytych. W literaturze opisano różne funkcje defuzyfikacji, w tym między innymi:

- **Ostatnie maksimum.** Niech  $(m_1, m_2, \dots, m_l)$  będzie ciągiem wartości lokalnie maksymalnych liczby rozmytej  $\tilde{a}$ , wówczas

$$LOM(\tilde{a}) = m_i,$$

gdzie  $i = \max\{j : m_j = mx, 1 \leq j \leq l\}$ , a  $mx = \max\{m_j : j = 1, 2, \dots, l\}$ .

- **Średnia z wartości maksymalnych.** Niech  $(m_1, m_2, \dots, m_l)$  będzie ciągiem wartości lokalnie maksymalnych liczby rozmytej  $\tilde{a}$ , to

$$MOM(\tilde{a}) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l m_i.$$

- **Środek obszaru.** Niech  $\tilde{a}$  będzie liczbą rozmytą o funkcji przynależności  $\mu(x)$ , wówczas

$$COA(\tilde{a}) = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx}.$$

Dla liczby trapezoidalnej  $\tilde{a} = (a, b, c, d)$

$$COA(\tilde{a}) = \frac{a^2 + ab + b^2 - c^2 - cd - d^2}{3(a + b - c - d)}.$$

### 3.2. Eksperymenty obliczeniowe

Na podstawie danych dotyczących przebiegu realizacji budowy zakładu produkcji szkła technicznego wygenerowane zostały instancje testowe na potrzeby przeprowadzenia badań stabilności rozwiązań uzyskanych dla danych deterministycznych oraz rozmytych (stabilność rozwiązań przedstawiono w pracy Bożejko i in. [3]). Instancje testowe zostały wygenerowane poprzez losowe powielenie czasów wykonania poszczególnych procesów. Eksperymenty obliczeniowe wykonano dla 9 grup instancji o różnych rozmiarach ( $n \times m$  - 5 x 17, 8 x 17, 10 x 17, 15 x 17, 20 x 17, 50 x 17, 100 x 17, 200 x 17 i 500 x 17). Każda grupa składa się z 10 instancji. Następnie, dla każdej instancji został uruchomiony algorytm konstrukcyjny NEH (Nawaz i in. [6]), dla liczb deterministycznych oraz trapezoidalnych liczb rozmytych.. Zbadano, między innymi, wpływ funkcji defuzyfikacji na stabilność uzyskanych rozwiązań. Zaburzenie danych, dla potrzeby wyznaczenia stabilności rozwiązań, polegało na uwzględnieniu sumy opóźnień na poszczególnych frontach roboczych.



W Tabeli 3 przedstawiono wyniki dotyczące stabilności rozwiązań wyznaczonych przez algorytm przeszukiwania z tabu. Poszczególne kolumny oznaczają:

- $S(A_d)$  - stabilność rozwiązań dla liczb deterministycznych,
- $S_{LOM}(A_f)$  - stabilność rozwiązań dla funkcji defuzyfikacji - ostatnie maksimum,
- $S_{MOM}(A_f)$  - stabilność rozwiązań dla funkcji defuzyfikacji - średnia z wartości maksymalnych,
- $S_{COA}(A_f)$  - stabilność rozwiązań dla funkcji defuzyfikacji - środek obszaru.

Tabela 3. Stabilność rozwiązań dla różnych funkcji defuzyfikacji.

n x m	$S(A_d)$	$S_{LOM}(A_f)$	$S_{MOM}(A_f)$	$S_{COA}(A_f)$
5 x 17	11,07	9,64	9,34	9,34
8 x 17	11,29	10,15	10,76	10,76
10 x 17	10,38	8,78	9,79	9,64
15 x 17	10,61	8,32	9,33	9,34
20 x 17	9,02	6,70	8,14	8,30
50 x 17	7,59	5,31	6,81	6,79
100 x 17	8,64	7,72	8,42	8,43
200 x 17	6,92	6,21	6,64	6,64
500 x 17	6,09	5,92	6,08	6,07
<b>średnia</b>	<b>9,07</b>	<b>7,64</b>	<b>8,37</b>	<b>8,37</b>

Stabilność rozwiązań uzyskanych dla danych deterministycznych jest gorsza w porównaniu do rozwiązań dla trapezoidalnych liczb rozmytych. Postać funkcji defuzyfikacji ma wpływ na współczynnik stabilności. Dla funkcji defuzyfikacji postaci - ostatnie maksimum otrzymano najbardziej stabilne rozwiązania. Średnie wartości współczynnika stabilności dla funkcji defuzyfikacji postaci średnia z wartości maksymalnych oraz środek obszaru są dokładnie takie same.

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono sposób wykorzystania harmonogramów powykonawczych do oceny przebiegu procesu budowy. Narzędzie to, choć znane wcześniej, nie było stosowane z uwagi na małe wykorzystanie w praktyce klasycznych harmonogramów budowy. Analiza harmonogramów powykonawczych może stać się narzędziem doskonalenia realizacji przedsięwzięć budowlanych oraz inspiracją to rozwoju metod konstrukcji bardziej stabilnych harmonogramów.

*Praca została częściowo sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/05/B/ST7/00102.*

## **Literatura**

1. Bożejko W., Hejducki Z., Wodecki M., Applying metaheuristic strategies in construction projects management, *Journal of Civil Engineering and Management*, Taylor & Francis, 2012 Volume 18(5), 621-630.
2. Bożejko W., Hejducki Z., Uchroński M., Wodecki M., Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic, *Journal of Civil Engineering and Management*, Taylor & Francis (in press), 2014
3. Bożejko W., Hejducki Z., Rajba P., Wodecki M., Algorytm memetyczny dla pewnego problemu potokowego w budownictwie, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji* (red. R. Knosala), Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2012, ISBN 978-83-930399-4-4, 251-262.
4. Grabowski J., Wodecki M.: A very fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem with makespan criterion, *Computers & Operations Research*, 31, 2004, 1891-1909.
5. Klimek M., Łebkowski P., Proaktywne harmonogramowaniu projektu z optymalizacją przepływów pieniężnych, *Automatyzacja procesów dyskretnych: teoria i zastosowania* (red. A. Świerniak, J. Krystek), ISBN 978-83-62652-41-9, 2012, 119-122.
6. Nawaz M., Enscore E.E., Ham I., A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem, *OMEGA*, 11/1, 1983, 91-95.
7. Rogalska M., Bożejko W., Hajducki Z., Wodecki M.: Harmonogramowanie robót budowlanych z zastosowaniem algorytmu tabu search z rozmytymi czasami wykonywania zadań, *Przegląd Budowlany*, Nr 7-8, 2009, 76-80.
8. M. Wodecki, *Metody agregacji w problemach optymalizacji dyskretnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009, ISBN 978-83-7493-449-7.

Prof. nadzw. dr hab. Wojciech BOŻEJKO

Mgr inż. Mariusz UCHROŃSKI

Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej

ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław

e-mail: wojciech.bozejko@iiar.pwr.wroc.pl

Prof. nadzw. Dr hab. Zdzisław HEJDUCKI

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Pl. Grunwaldzki 11

e-mail: zdzislaw.hejducki@ict.pwr.wroc.pl

Prof. nadzw. dr hab. Mieczysław WODECKI

Instytut Informatyki Uniwersytetu Wrocławskiego

ul. Joliot-Curie 50-383 Wrocław

e-mail: mwd@ii.uni.wroc.pl